

Проведенное в работе тестирование разработанного алгоритма на примере решения задачи о туннелировании через двухбарьерную структуру показало качественное совпадение результатов моделирования с известными литературными данными [4].

### Литература

1. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридичин. Основы нанoeлектроники: Учебное пособие. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2000. 332 с.
2. В.П. Маслов, М.В. Федорюк. Квазиклассическое приближение для уравнений квантовой механики. М.: Наука, 1976. 296 с.
3. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 304 с.
4. Petersen Rene. Theoretical Investigation of the Resonant Tunneling Phenomena and its Applications in Resonant Tunneling Diodes // Aalborg University, Faculty of Engineering and Science Institute of Physics and Nanotechnology // Mini-project, 2007. 20 p.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТОКА В ДЛИННЫХ ВЫСОКООМНЫХ СТРУКТУРАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОЙ ЗАСВЕТКИ

*А.И. Михайлов, А.В. Митин, А.И. Терентьева*

(г. Саратов, ФГБОУ Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, MikhailovAI@info.sgu.ru, Mitin\_AV@mail.ru, Terenteva\_A\_I@mail.ru)

## THE MATHEMATICAL MODELING OF RECOMBINATION CURRENT INSTABILITIES IN LONG HIGH-RESISTIVITY GALLIUM ARSENIDE STRUCTURES UNDER LOCAL LIGHT ACTION

*A.I. Mikhailov, A.V. Mitin, A.I. Terenteva*

В ходе экспериментальных исследований [1] было установлено, что в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия возможно наблюдение отрицательной дифференциальной проводимости и соответствующих низкочастотных осцилляций тока, возникновение которых может быть объяснено физическим механизмом развития в структуре рекомбинационных неустойчивостей тока, обусловленных зависящим от поля захватом свободных носителей заряда глубокими примесными центрами.

Численные эксперименты, проведенные в [2], показали, что в длинных высокоомных структурах  $n^+ - n^- - n - n^+ - GaAs$  с длиной активной области 500 мкм при концентрации глубоких примесных центров в диапазоне от  $6 \cdot 10^{14}$  до  $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  развивается рекомбинационная неустойчивость тока, характеризующаяся периодическим формированием вблизи катода ( $t_1$ ), движением через активную область ( $t_2$ ) и уходом в анод (исчезновением) ( $t_3$ ) медленных доменов сильного электрического поля (рис. 1), сопровождающаяся возникновением низкочастотных колебаний тока (рис. 2).

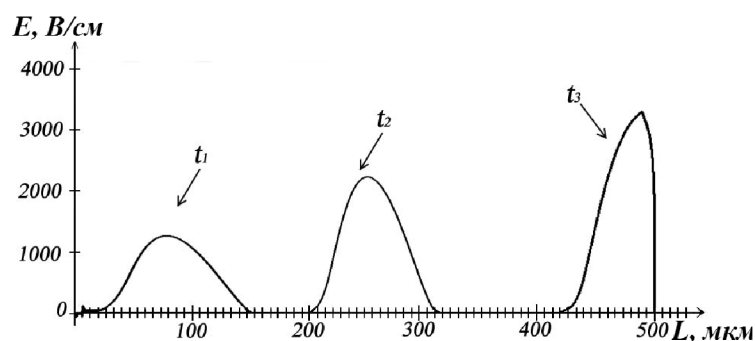


Рис. 1

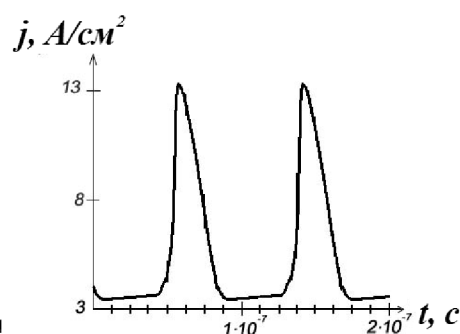


Рис. 2

В данной работе на основе локально-полевой математической модели, позволяющей анализировать динамику пространственного заряда и тока в длинных высокоомных структурах  $n^+ - n^- - n - n^+ - GaAs$  в условиях захвата свободных носителей заряда глубокими примесными уровнями, исследуется влияние локальной засветки на спектр генерируемых низкочастотных токовых колебаний.

Локальность засветки моделируется введением в некоторой части шириной  $d$  активной области структуры дополнительного к концентрации доноров  $N_D(x)$  слагаемого  $N_{D+}(x)$ :

$$N_{D+}(x) = N_{Dmax} \cdot \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( 2\pi \cdot \frac{(x-x_0)}{d} \right) \right],$$

где  $N_{Dmax}$  – максимальное значение функции  $N_{D+}(x)$ , соответствующее середине освещаемой области;  $x$  – координата точки в освещаемой области;  $x_0$  – координата середины освещаемой области.

Обоснованность описанного способа учета локальности засветки в модели объясняется существенно меньшей подвижностью дырок ( $\mu_p = 400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ) по сравнению с подвижностью электронов ( $\mu_n = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ) в полупроводниковом образце  $GaAs$ .

На рис. 3 приведены зависимости амплитуд первых четырех гармоник тока  $j_1$  (рис. 3, а),  $j_2$  (рис. 3, б),  $j_3$  (рис. 3, в) и  $j_4$  (рис. 3, г) от величины постоянного приложенного напряжения  $U$  при различной локализации области засветки шириной  $d = 42 \text{ мкм}$  ( $N_{Dmax} = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) для структуры с длиной активной области  $L_0 = 500 \text{ мкм}$  и концентрацией доноров в основной ее части  $N_D = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

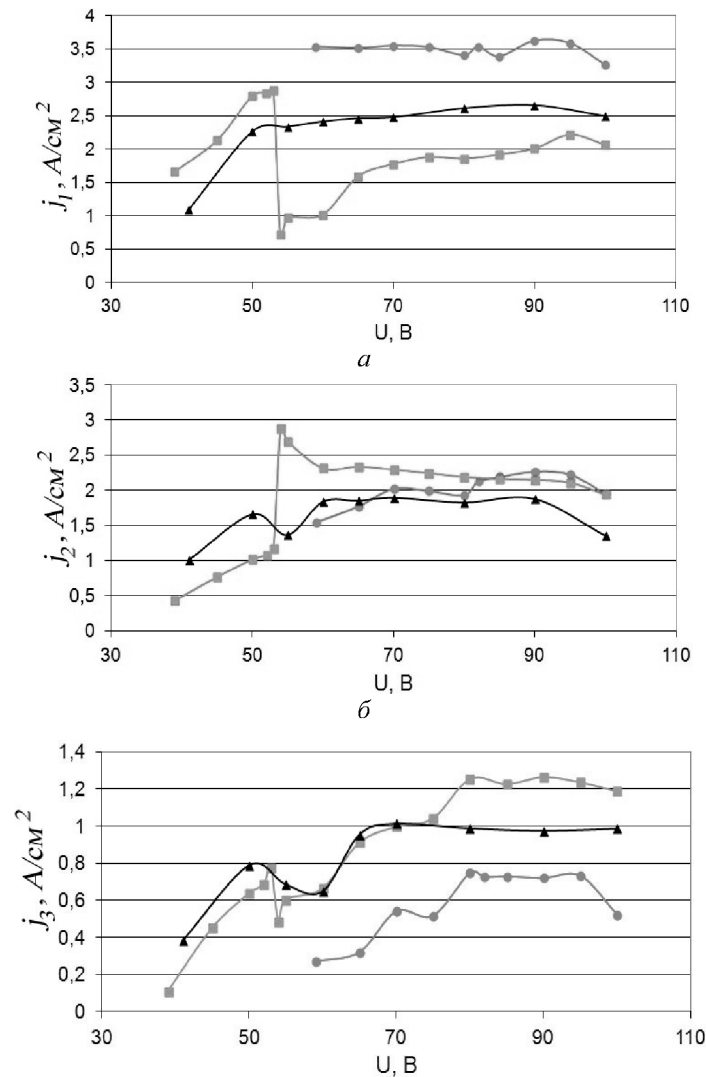




Рис. 3

Локальная засветка длинных высокоомных структур  $n^+ - n^- - n - n^+ - GaAs$  вблизи катода приводит к увеличению порогового напряжения возникновения токовых колебаний по сравнению с неосвещенным образцом и уменьшению частоты генерируемых осцилляций тока во всем диапазоне прикладываемых напряжений. Анализ нелинейной динамики пространственного заряда и тока в исследуемых структурах показывает, что увеличение порогового напряжения возникновения неустойчивости в структуре связано с образованием на катоде статического домена, препятствующего формированию подвижного дипольного домена при меньших напряжениях.

Увеличение концентрации подвижных носителей заряда, происходящее при локальной засветке вблизи катода, приводит, к уменьшению в области засветки и одновременному увеличению за ее пределами напряженности электрического поля, что и обуславливает примерно 40 % увеличение амплитуды основной гармоники  $j_1$  (рис. 3, а) и 40 % уменьшение амплитуды третьей гармоники  $j_3$  (рис.3, в) во всем диапазоне прикладываемых напряжений. Амплитуды второй  $j_2$  и четвертой  $j_4$  гармоник при локальной засветке вблизи катода остаются практически неизменными по сравнению с неосвещенным образцом (рис. 3, б и г, соответственно).

В случае локального освещения образца в середине активной области структуры наблюдается практически двукратное изменение частоты генерации при достижении значения напряжения  $U = 54$  В.

Численные эксперименты показывают, что при локальной засветке в середине активной области структуры при достижении напряжения  $U = 54$  В происходит изменение динамического состояния системы, связанное с увеличением амплитуды и ширины домена, формирующегося вблизи катода. В этом состоянии домен не исчезает, подходя к области засветки, а проходит через нее, достигает анода и создает максимум тока. В связи с этим наблюдается резкое изменение амплитуд всех гармоник полного тока, а именно, одновременное уменьшение амплитуд нечетных и увеличение амплитуд четных гармоник. При значениях напряжения  $U > 54$  В также наблюдается 20 % уменьшение амплитуды основной гармоники и увеличение амплитуд второй и третьей гармоник по сравнению с неосвещенным образцом, а амплитуда четвертой гармоники остается практически неизменной, что, вероятнее всего, обусловлено уменьшением ширины домена при прохождении области локальной засветки (рис. 3).

При локальной засветке вблизи анода частота генерируемых токовых колебаний незначительно увеличивается в связи с уменьшением эффективной длины структуры, ограниченной омическим контактом со стороны катода и областью засветки.

Анализ нелинейной динамики пространственного заряда и тока в длинных высокоомных структурах  $n^+ - n^- - n - n^+ - GaAs$  в условиях рекомбинационной неустойчивости при воздействии локальной засветки на активную область позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на спектральный состав генерируемых низкочастотных колебаний тока оказывает локальная засветка в середине активной области структуры, которая приводит к

двукратному увеличению частоты колебаний и резкому изменению амплитуд высших гармоник полного тока.

### **Литература**

1. Михайлов А.И., Митин А.В., Терентьева А.И. Исследование рекомбинационной неустойчивости тока в длинных структурах на основе высокоомного GaAs // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы IX Международной научно-технической конференции. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та. 2010. С. 84.
2. Михайлов А.И., Митин А.В., Терентьева А.И. Исследование влияния концентрации глубоких примесных уровней на возникновение устойчивых рекомбинационных и ганновских колебаний тока в длинных высокоомных структурах  $n^+-n^-n^+-GaAs$  // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ». С.-Пб. СПбГЭТУ. 4-7 июня 2012: Сборник трудов конференции. Том 2. С.-Пб. 2012. С. 322-326.

### **РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ДИОДЕ**

*А.И. Михайлов, В.С. Тяжлов, Д.В. Григорьев*

(Саратов, Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
MikhailovAI@info.sgu.ru, GrigorievDV@bk.ru)

### **DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HIGH MULTIPLICITY MICROWAVE FREQUENCY MULTIPLIER ON SEMICONDUCTOR DIODE**

*A.I. Mikhailov, V.S. Tyazhlov, D.V. Grigoriev*

Радиолокация уже многие десятилетия остается важнейшим техническим средством для решения как гражданских, так и военных задач. Радиолокационная станция (РЛС), как бортовая, так и стационарная представляет собой сложнейшую радиотехническую систему, в которой для обработки информационных сигналов используется большой набор частот. Для формирования этой большой сетки частот используются самые разные и электровакуумные, и твердотельные приборы и устройства – от генераторов и синхронизированных усилителей, до сложнейших схем синтезаторов частот. Одним из важнейших элементов синтезаторов (формирователей) частот являются умножители частоты, активными элементами которых чаще всего выступают полупроводниковые умножительные диоды [1]. Конкретная схема умножителя частоты в зависимости от многих факторов может строиться либо как многокаскадное устройство, состоящее из умножителей частоты с небольшой кратностью (реально – на 2 или на 3 каждый), либо как однокаскадная схема с умножением высокой кратности (больше 10) [2]. У каждого из этих способов построения конкретной схемы есть свои достоинства и недостатки, хотя нужно сказать, что схемы с высокой кратностью умножения, активно изучаемые и используемые в реальной аппаратуре в последние годы, пока все-таки имеют существенно меньшее распространение. Из литературных данных известно, что в реальных диодных умножителях частоты с выходом в сантиметровом диапазоне при коэффициенте умножения равном двум максимально достигаемый КПД составляет около 60-70 %, а при коэффициенте умножения равном трем КПД уже не превышает 40...50 %, а в умножителе частоты на восемь может достигать лишь 10...12 % [3]. Тем не менее, представляется совершенно очевидным, что потенциально умножители частоты высокой кратности должны обеспечивать меньшие шумы, меньшее энергопотребление, габариты и вес умножителю, что особенно важно, когда речь идет о бортовых системах.